

[1050] パルス振動を利用した締固め効果について

正会員 ○小川朗二(前田建設工業 技術研究所)
 正会員 渡部 正(前田建設工業 技術研究所)
 三島徹也(前田建設工業 技術研究所)
 正会員 山田一字(前田建設工業 技術研究所)

1. はじめに

現在、RCD用のコンクリート、ロックフィルダムおよび道路盛土などの締固め作業には、振動を利用した機械が使用されている。これら締固め機械の起振方式は、回転軸を中心として半径方向に振動させる一軸偏心式か、または、二つの偏心体でそれぞれ2本の回転軸を等速対向に回転させ上下振動のみを発生させる二軸偏心式である。いずれにしてもこれらの振動波形は、正弦波であり、締固め材料に振動を与え、内部摩擦を減少させ、機械の自重によつて締固めを行うものである。一方、近年ポーランドのK.H. Eymanは、フレッシュコンクリートをより強力に締固める方法として、パルス波を利用することを考案した。

本報告は、このパルス振動の発生原理と、パルス振動と正弦波振動を利用し、振動締固め実験を行った結果について述べたものである。

2. パルス振動

2.1 パルス振動の原理

パルス波は、非正弦波のうちでひずんだ波形を言い、多数の正弦波を重ね合わせたものと考えられる。我々がここで取上げるパルス波とは、質量を伴った衝撃力のことである。この衝撃力は急激にあらわれかつ短時間のうちに作用する大きな力で、数組の偏心体の遠心力が一方向に集中した場合に生ずる。

図-1(a)は、一組の偏心体が一定の角速度 ω で互いに反対方向に回転する状況を示したものである。偏心体の遠心力 $\frac{1}{2}A$ の垂直成分 b は集積されるが、一方、水平方向成分 a は互いに逆向きで打ち消される。これを式で表わすと、

$$P = 2b = A \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここで P は垂直方向に集積された力であり、 A は遠心力である。図-1(b)は、4組の正弦波を重ね合わせることによつてパルス波を発生させる原理を示したものである。パルス波の周期は、一番遅く回転する偏心体の一回転に等しい。パルス波を発生させるには、次の3つの条件を満たしていなくてはならない。

- (1) 偏心体に回転運動を与える前に、全ての偏心体を所望のパルス方向に

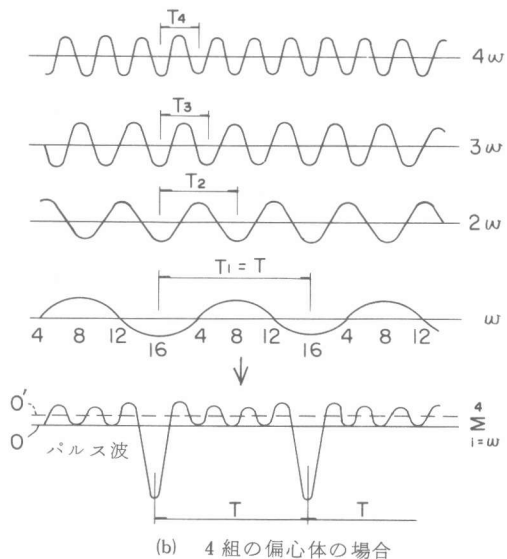
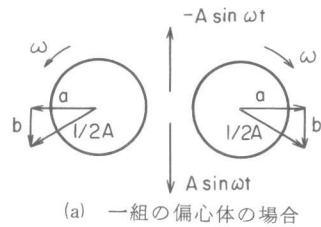


図-1 パルス波発生原理

合せて固定しなければならない。

- (2) 対をなす偏心体は、互いに異なった速度で回転運動をし、それが互いに連続した整数になるようにしなければならない。
- (3) 全ての偏心体の遠心力の大きさを等しくする。

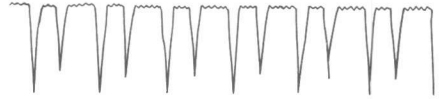


図-2 Eyman のパルス波形

図-2は、Eymanが試作したパルス振動機の実際の波形を示したものである。

2.2 パルス振動発生方法の一例

図-3は、パルス振動発生方法の一例を示したものである。この方法は、遊星歯車に偏心体を取りつけ、太陽歯車の回りを回転させることで、偏心体に自転、公転運動を与え、パルス振動を得る方法を示している。図-4は、この方法を利用して得られるパルス振動機の一部を示したものである。以下にパルス振動の発生原理について述べる。

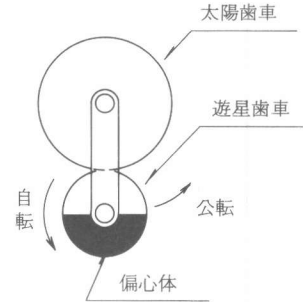


図-3 パルス振動発生方法

2.2.1 角速度 1ω と 3ω から得られる振動

図-5は、半径 a の遊星歯車が半径 $2a$ の固定された太陽歯車の回りを角速度 ω で回転している状況を示したものである。遊星歯車には偏心量 r 、偏心体質量 m なるものが取り付けられている。この偏心体は、太陽歯車の中心 O まわりに公転し、かつ遊星歯車の中心 P 回りに自転運動を行う。この運動によつて発生する慣性力が振動源となる。時刻 $t=0$ において P の位置にいる遊星歯車の中心は、時刻 t において P' に移動する。また、偏心体の重心 G は、この間に G' に移動する。遊星歯車と太陽歯車の半径比が $1:2$ であるから G は P の回りを $2\theta (=2\omega t)$ だけ回転する。ところが G の回転軸である P もまた、太陽歯車の中心 O を中心として θ だけ回転していることを考慮すれば、 G は X 軸に対して 3θ 回転することになる。 O を原点とし、時刻 t における偏心体の中心 G' の座標は、次式で表わされる。

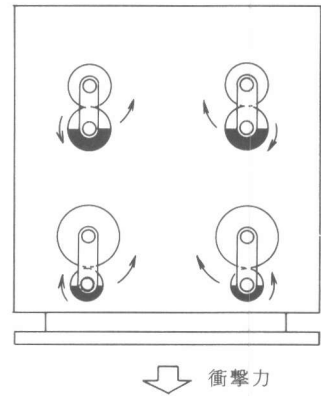


図-4 パルス振動機

$$x = 3a \cos \omega t + r \cos 3\omega t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$y = 3a \sin \omega t + r \sin 3\omega t \quad \dots\dots\dots (3)$$

この運動によつて発生する慣性力は、次式で表わされる。

$$F_x = 3ma\omega^2 \cos \omega t + 9mr\omega^2 \cos 3\omega t \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$F_y = 3ma\omega^2 \sin \omega t + 9mr\omega^2 \sin 3\omega t \quad \dots\dots\dots (5)$$

x 軸方向の慣性 F_x について考えると、(4)式から F_x は、調和振動の θ 成分と 3θ 成分を合成したものとなっている。偏心量 r を、 $r = a/3$ とすると、(4)式は、

$$F_x = 3ma\omega^2 (\cos \omega t + \cos 3\omega t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。これは Eyman 方式で言えば、角速度 ω と 3ω で回転する2つの偏心体が発生する慣性力を合成したものと同じである。図-7(a)は、 1ω と 3ω の合成された振動波形を示したものである。

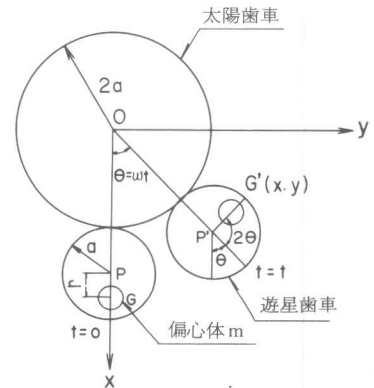


図-5 遊星歯車の動き (1ω と 3ω の場合)

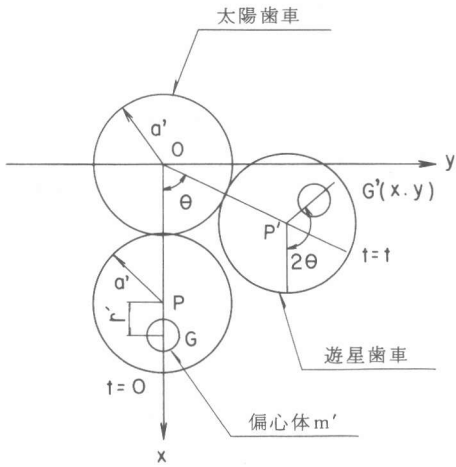


図-6 遊星歯車の動き(2ωと4ωの場合)

2.2.2 角速度 2ωと4ωから得られる振動

図-6は、太陽歯車と遊星歯車の半径比が1:1のときの遊星歯車の動きを示したものである。この場合も、遊星歯車は、太陽歯車の回りを角速度ω'で回転し、かつPを中心に自転している。この運動によって得られる慣性力は、前述と同様にして求めると、

$$F_x = 2m'a'\omega'^2 \cos \omega't + 4m'r'\omega'^2 \cos 2\omega't \quad (7)$$

$$F_y = 2m'a'\omega'^2 \sin \omega't + 4m'r'\omega'^2 \sin 2\omega't \quad (8)$$

となる。x軸方向の慣性力F_xは、偏心量r'を、r' = a/2、角速度θ = ω'tを、ω' = 2Wとすることにより、

$$F_x = 8m'a'\omega'^2 (\cos 2\omega't + \cos 4\omega't) \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。ここで(6)式と(9)式で3ma = 8m'a'を満たすようにして合成すると、

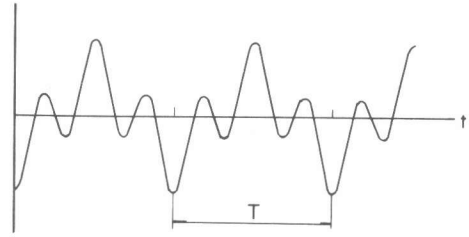
$$F_x = 3ma\omega'^2 (\cos \omega't + \cos 2\omega't + \cos 3\omega't + \cos 4\omega't) \quad \dots\dots\dots(10)$$

となる式を得る。y方向の慣性力F_yは、締固めには不要な力であり、互いに反対方向に回転する偏心体を設けることにより消去することができる。図-7(b)に2ωと4ωの合成された振動波形を、図-7(c)に2組の遊星歯車機構から得られるパルス振動波形を示す。

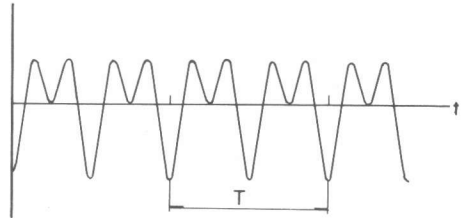
3. 実験概要

配合は、RCD用コンクリートの配合を基本とした。表-1に実験でを使用した配合を示す。また、表-2は今回の締固め実験の要因と水準を示したものである。

実験は、図-8に示すように鋼製の型枠を用いて行った。ミキサーで3分間練り混ぜたコンクリートを、底板から55cmの高さまで骨材が均一



(a) 1ωと3ωから得られる振動波形



(b) 2ωと4ωから得られる振動波形

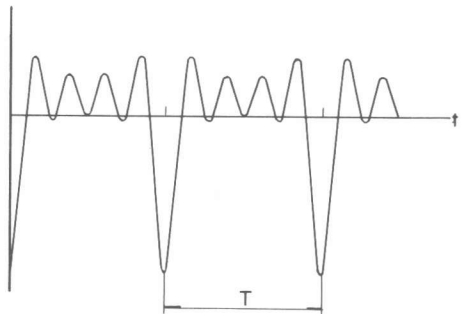


図-7(c) 2組の遊星歯車機構を組み合わせて得られるパルス振動波形

$$\dots\dots\dots(9)$$

$$\dots\dots\dots(10)$$

表-1 配合表

配合	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				V/C値 (小型)
				W	C	S	G	
1	80	87.5	34	105	120	766	1513	21 ^砂
2	"	79.2	"	95	"	776	1530	57
3	"	70.8	"	85	"	785	1547	-
4	"	62.5	"	75	"	794	1567	-
5	"	54.2	"	65	"	803	1583	-

セメント：中庸熟ポルトランドセメント
 細骨材：秩父産硬質砂岩系細砂 比重2.66, 吸水率1.41
 粗骨材：秩父産硬質砂岩系砕石 比重2.71, 吸水率0.58
 空隙率31.9% (VC試験機使用)
 混和剤：リグニスルホン酸塩系A E減水剤

に分布するよう注意して投入した。なお、締め固め実験と並行してVC試験機を用いてVC値を測定した。単位水量が $85\text{kg}/\text{m}^3$ 以下では、モルタルの浮上が見られずVC値の測定はできなかった。締め固め時間は10分間とし、経過時間ごとに表面沈下量を測定した。締め固めたコンクリートは、硬化後脱型し、水中養生にした。養生後コアボーリングを行い、コアの圧縮強度試験(σ_{91})を行った。起振機は、正弦波振動発生用とパルス振動発生用の2機種を用い、自重、起振力とも両者が同じくなるよう調整した。ここで起振力とは、正弦波の場合、偏心体が一定の角速度で回転している時に発生する遠心力であり、一方、パルス波の場合、数組の偏心体が異なった角速度で回転している時、同一方向に生ずる遠心力の総和を称している。式(10)の F_x は、パルス波の起振力を表わしたものである。

4. 実験結果および考察

4.1 振動波形の影響

型枠底板上(表面から 55cm の位置)に土圧計をセットし、起振力を同一にして振動圧力を測定した結果を図-9、図-10に示す。図-9は、2軸偏心式の正弦波発生用起振機が発生した振動波形でありサインカーブの形状をなしている。この時の振動圧力は、最大で $0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ で上下に同じように振動している。また、図-10は、パルス発生用起振機が発生する振動波形を示したものである。図より、この振動波形は、周期 T ごとに下向きに大きくひずんでおり、この起振機が、十分なパルスを発生していることが確認できる。この時の振動圧力は、最大で、 $1.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度発生している。この値は、正弦波のそれと比較するとかなり大きな値である。

図-11は、周波数(起振力)を変化させていったときの振動圧力を示したものである。このときも土圧計の位置は前述と同じく、型枠底板上とした。図から明らかなように、正弦波においては、起振力を大きくしても、土圧計に伝達される振動圧の変化は小さい。一方、パルス波では、起振力の大きさに応じて振動圧も大きくなり、周波数が 45Hz 近辺で振動圧力が最大となる。さらにそれ以上周波数を高くした場合、逆

表-2 要因と水準

要因	水準
波形	パルス波, 正弦波
単位水量 (kg/m^3)	65, 75, 85, 95, 105

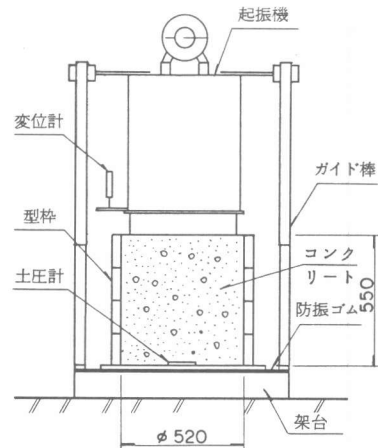


図-8 実験装置

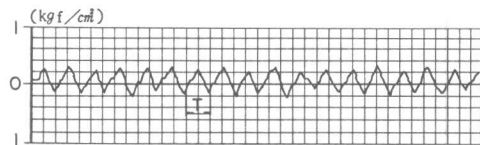


図-9 正弦波振動波形

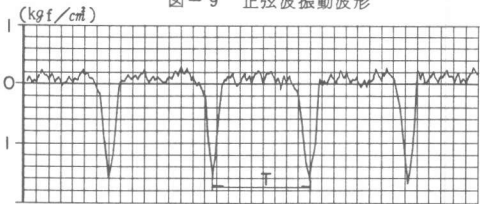


図-10 パルス振動波形

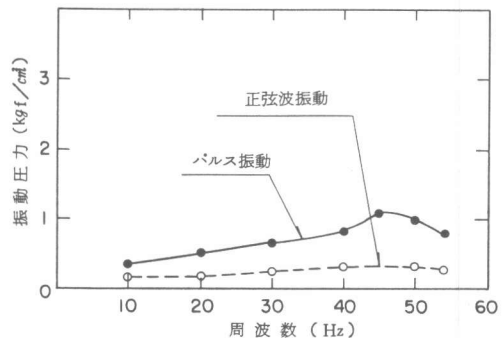


図-11 周波数(起振力)と振動圧力の関係

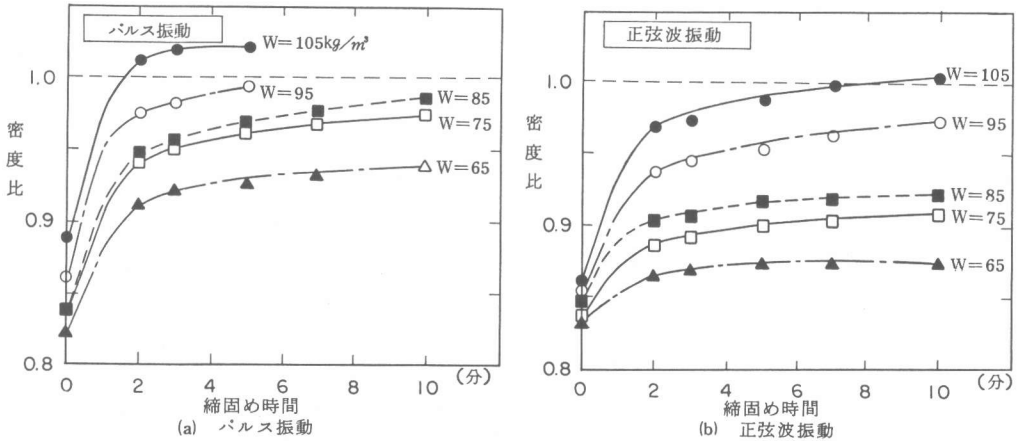


図-12 締固め時間と密度比の関係

に振動圧力が減少していく。これは試験装置全体の固有振動数の影響を受けているのではないと思われる。

4.2 締固め時間と密度の関係

締固め密度は、型枠内に投入したコンクリート重量と沈下量の関係から算出した。締固めの進行に伴う密度比の変化曲線は、図-12 (a), (b)に示すとおりであり、振動波の違いによる影響が明確に表われている。なお、密度比とは、次式のように定義したものである。

$$\text{密度比} = \frac{\text{締固め密度}}{\text{理論最大密度}} \quad (1)$$

ここで理論最大密度とは、ペースト容積と細骨材の空隙容積を考慮したもので、次式のように定義した。

$$\text{理論最大密度} = \frac{\text{空気量が全くないものとして計算した単位容積重量}}{1 + \text{空隙量}} \quad (2)$$

パルス振動の場合、単位水量が $W=95, 105 \text{ kg/m}^3$ の配合では、締固め5分後にペースト分が浮上し、ブリージング水が認められ、その時点で密度比がほぼ1.0に達した。一方、正弦波振動でも、これらの配合ではペースト分の浮上が認められたが $W=95 \text{ kg/m}^3$ で10分、 $W=105 \text{ kg/m}^3$ で7分と、パルス振動より長い締固め時間を要した。図-13は、締固め10分後の単位水量と密度比の関係を示したものであるが、いずれの配合においても密度比は、パルス振動の方が正弦波振動より著しく大きな値を示した。

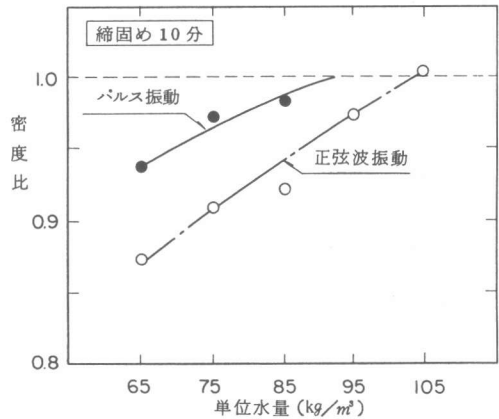


図-13 単位水量と密度比の関係

4.3 コア供試体の品質特性

締固め終了後の供試体を標準水中養生し、それより $\phi 20 \times 40 \text{ cm}$ のコアを採取した。そして材令91日で密度および圧縮強度を測定した。単位水量と密度、および密度比の関係を図-14に、単位水量と圧縮強度の関係を図-15に示した。図-14を見ると、硬化後の密度比が、硬化前より増加している。これはコアの採取位置が供試体のセンターであり良く締つた位置から採取しているのに対し、図-13の硬化前の密度比は、沈下量から算定した型枠

内全体の平均的値であるため、両者に差が生じたものと思われる。単位水量が $W=95\text{kg/m}^3$ および 105kg/m^3 では、パルス振動、正弦波振動とも密度は同程度の値であるが、それより少ない単位水量では、正弦波振動で著しい低下が認められる。 $W=65\text{kg/m}^3$ で比較すると、パルス振動における密度比が0.966であるのに、正弦波振動では0.881しかない。

圧縮強度においても密度と同様な傾向が認められ $W=95\text{kg/m}^3$ と 105kg/m^3 では、それぞれの振動波による違いは見受けられないが、それ以下の単位水量では、正弦波振動の方が著しい低下を示している。

以上のように、パルス振動は、従来の正弦波振動に比較して優れた締固め特性を発揮することが実験的に明らかとなった。特に、単位水量が少ない配合においてその効果が顕著に表われている。このことは、図-9および図-10からも明らかのように、正弦波振動の振動エネルギーは、主にコンクリートを揺動し、その内部摩擦力を低減することに消費され、その結果締固めが進行していくものと思われる。ところが、下向きの振動圧が小さいために、深部のコンクリートを締固めるのに十分なエネルギーが伝達されないのではないかとと思われる。これに対しパルス振動の締固めは、内部摩擦力が低下して行われる割合よりは、むしろ、縦波による締固めが行われる方の効果が大きいのではないかとと思われる。

5. 結論

本研究により得られた主要な結論を要約すると次のようになる。

- (1) パルス振動と正弦波振動において起振機の自重、起振力を同一にした場合、超硬練りコンクリートに伝達される振動圧は、パルス振動の方が著しく大きい。
- (2) 密度、圧縮強度を比較した結果から判断すると、パルス振動は、締固めに非常に効果が大きい。

以上、パルス振動が従来式の正弦波振動に比較して、優れた締固め特性を有していることが実験的に明らかとなったが、今後とも実験を重ね、パルス振動の有効性を十分に確認し、パルス振動の有効利用を計っていく予定である。

参考文献

- 1) K. H. Eyman : Pulses in Concrete Technology ACI JOURNAL March-April 1980
- 2) RCD 工法によるダム施工：(財)国土開発技術センター編集

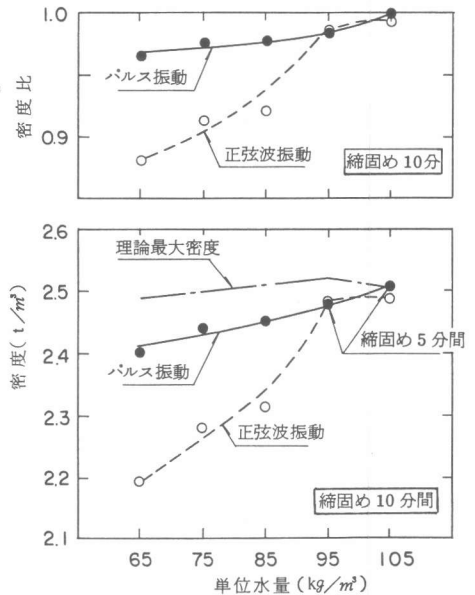


図-14 コア供試体における単位水量と密度、密度比の関係

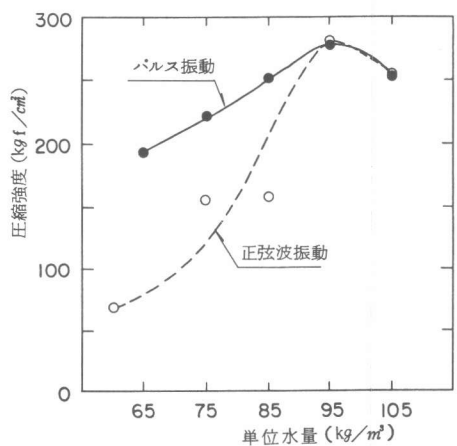


図-15 コア供試体における単位水量と圧縮強度の関係